

مطالعه آزمایشگاهی رفتار چرخه‌ای اتصال در قاب‌های بتنی نیمه پیش‌ساخته با وصله مکانیکی و آرماتور با مقاومت بالا

مجتبی هروی^۱، رضا وهدانی^{۲*}، علی خیرالدین^۳

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۳- استاد ممتاز دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

rvahdani@semnan.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۳۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۱۳

چکیده

چهار نمونه آزمایشگاهی از اتصال میانی تیر به ستون در قاب خمشی بتن‌آرمه ساخته شده است. دو تفاوت اصلی بین نمونه‌ها در مرحله ساخت شامل رده مقاومتی آرماتورها و نیمه پیش‌ساختگی اتصال یا یکپارچگی اتصال است. دو نمونه اتصال مینا به صورت یکپارچه ساخته شده است و دو نمونه اتصال دیگر به صورت نیمه‌پیش‌ساخته تولید شده‌اند. طرح‌ریزی اتصالات نیمه‌پیش‌ساخته به شکلی انجام شده که وصله مکانیکی مورد استفاده قرار گرفته است و به جوشکاری در محل پروژه نیاز ندارد. آزمایش تعیین مقاومت فشاری بتن و همچنین آزمایش تعیین مقاومت کششی آرماتورهای مصرفی انجام شده است. پس از ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها، بارگذاری چرخه‌ای طبق ACI T1.1R-01 اعمال شده است. سپس با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، پارامترهای مقاومت تسلیم، مقاومت نهایی، شکل‌پذیری تغییر مکانی و انرژی جذب شده در نمونه‌ها تعیین شده و مورد مطالعه قرار گرفته است. در محدوده پارامترهای متغیر و مصالح بکار رفته در این پژوهش نتیجه‌گیری شده است که استفاده از آرماتور با رده مقاومت بالاتر موجب افزایش مقاومت تسلیم و مقاومت نهایی نمونه‌ها شده است به شکلی که مقدار این افزایش مقاومت در نمونه اتصالات یکپارچه ۸ درصد افزایش و در اتصالات نیمه پیش‌ساخته ۳۲ درصد افزایش یافته است. افزایش مقاومت آرماتورها موجب کاهش ۳۶ درصدی شکل‌پذیری اتصالات یکپارچه شده است. همچنین افزایش رده مقاومت آرماتورها موجب شده است تا انرژی جذب شده در اتصالات یکپارچه ۱۸ درصد کاهش و در اتصالات نیمه پیش‌ساخته ۱۵ درصد کاهش پیدا کند. در اتصالات نیمه پیش‌ساخته، مقاومت تسلیم و مقاومت نهایی کوچک‌تر از اتصالات یکپارچه است. زمانی که از آرماتور رده S400 در ساخت نمونه اتصالات استفاده شود، مقاومت تسلیم و مقاومت نهایی نمونه نیمه پیش‌ساخته ۲۳ درصد کوچک‌تر و نسبت شکل‌پذیری ۲۸ درصد کوچک‌تر از نمونه اتصال یکپارچه است. انرژی جذب شده در اتصالات نیمه پیش‌ساخته ۲۸ درصد کوچک‌تر از انرژی جذب شده در اتصالات یکپارچه است.

واژگان کلیدی: مقاومت‌های تسلیم و نهایی، نسبت شکل‌پذیری، انرژی جذب شده، اتصال میانی قاب، بارگذاری چرخه‌ای.

۱- مقدمه

نشیمن تیر باشد و عکس‌العمل قائم تیر را به ستون منتقل کند. برای تأمین لنگر خمشی مقاوم در اتصال، میل‌گردهای انتظار و بیرون‌زده از ستون با میل‌گردهای تیر هم‌پوشانی شده و سپس در بتن‌ریزی درجا مدفون شده‌اند. در پژوهش آنها به بررسی اثر طول اتصال میل‌گردها و همچنین تأثیر وجود آرماتور عرضی در میانه ارتفاع اتصال پرداخته شده است. پرستش و همکاران نتیجه گرفتند که اتصال پیش‌ساخته پیشنهادی آنها عملکرد خوبی را دارد و برای مناطق لرزه‌خیز قابل‌استفاده است [5].

ها و همکاران به کمک مطالعه آزمایشگاهی به ارزیابی عملکرد اتصال پیشنهادی خود پرداختند. در اتصال پیشنهادی آنها، تیرهای بتنی دارای کابل فولادی U شکل در پایین تیر بودند به شکلی که این قسمت U شکل در بتن‌درجای هسته اتصال تیر به ستون بتنی قرار می‌گرفت. پارامترهای متغیر پژوهش آنها شامل تعداد رشته کابل‌های فولادی در تیر پیش‌ساخته بتنی، و همچنین حضور و عدم حضور آرماتور عرضی ناحیه اتصال است. ها و همکاران نتیجه گرفتند که کابل فولادی U شکل موجب بهبود عملکرد سازه‌ای و انتقال بهتر نیروها از تیر به ستون می‌شود؛ و اتصال پیشنهادی با آرماتورهای عرضی در اتصال برای نواحی با لرزه‌خیزی متوسط کافی است [6, 7].

زمانی بیدختی و شریعتمدار نتایج آزمایش‌های خود را بر روی سه نوع اتصال بتنی پیش‌ساخته با جزئیات متفاوت و یک نمونه اتصال یکپارچه ارائه کردند. تفاوت سه نوع اتصال پیش‌ساخته آنها در چگونگی تأمین پیوستگی تیرهای طرفین ستون است. زمانی بیدختی و شریعتمدار نتیجه گرفتند که رفتار نمونه اتصال پیش‌ساخته‌ای که در آن آرماتورهای طولی بالا و پایین تیر به طور پیوسته از هسته اتصال در ستون عبور کرده‌اند خیلی شبیه به رفتار نمونه اتصال یکپارچه است و می‌توان آن را برای مناطق با لرزه‌خیزی بالا استفاده کرد.

[8, 9]

در سال ۲۰۱۷ مدح‌خوان و همکاران با استفاده از آنالیز اجزاء محدود غیرخطی در نرم‌افزار، رفتار دو اتصال پیشنهادی

ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها پس از وقوع زلزله مبین این نکته است که خرابی سازه‌های نیمه پیش‌ساخته بتن‌آرمه بیشتر در ناحیه اتصالات رخ داده است. یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار چرخه‌ای اتصالات نیمه پیش‌ساخته، تأمین پیوستگی کافی برای آرماتورهای طولی تیر در هسته اتصال تیر به ستون است. یکی از راه‌های تأمین پیوستگی آرماتورهای طولی، استفاده از وصله مکانیکی است.

از سوی دیگر، به منظور کاهش تراکم آرماتورها در المان‌ها و هسته اتصالات سازه‌های بتن‌آرمه، استفاده از آرماتور با مقاومت بالا مورد توجه قرار گرفته است.

دستیابی به مقاومت و سختی خمشی مناسب و رفتار شکل‌پذیر در اتصالات پیش‌ساخته بتنی دارای مشکلات اجرایی است بنابراین اتصالات نیمه پیش‌ساخته مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در بخش‌هایی از اتصالات نیمه پیش‌ساخته از بتن درجا و یا گروت استفاده می‌شود؛ پس به دلیل پیوستگی بهتر اعضای اتصال در اتصالات نیمه پیش‌ساخته، دستیابی به مقاومت و سختی خمشی مناسب و رفتار شکل‌پذیر در اتصالات نیمه پیش‌ساخته راحت‌تر از اتصالات پیش‌ساخته است.

الوکر و همکاران مطالعات لرزه‌ای مربوط به اتصالات تیر به ستون قاب‌های بتنی پیش‌ساخته را انجام دادند [1, 2]. در پژوهش آنها دو نمونه اتصال تحت بارگذاری یک‌طرفه و بارگذاری دوطرفه مورد آزمایش قرار گرفته است. جزئیات مختلف آرماتورگذاری برای تأمین پیوستگی سازه‌ای آرماتورهای تیر و همچنین نوع قاب دوطرفه یا سه‌بعدی نمونه‌ها به عنوان پارامترهای متغیر در پژوهش ایشان است. الوکر و همکاران نتیجه گرفتند که مقاومت برشی چشمه اتصال در نمونه‌های پیش‌ساخته بین ۸۰ تا ۹۰ درصد مقاومت برشی چشمه اتصال در نمونه یکپارچه است.

پرستش و همکاران از ستون پیوسته و تیرهای جدا از هم برای ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی استفاده کردند [3, 4]؛ در نمونه اتصال آنها یک فرورفتگی در ستون تعبیه شده است تا

اتصالات پیش‌ساخته کمتر از شکل‌پذیری اتصال یکپارچه است [14].

در سال ۲۰۲۰ و ۲۰۲۲ یو و همکاران عملکرد لرزه‌ای اتصالات تیر به ستون بتنی پیش‌ساخته با آرماتورهای با مقاومت بالا را مطالعه کردند. آنها با ساخت سه نمونه آزمایشگاهی به بررسی رفتار لرزه‌ای اتصال پیشنهادی خود پرداختند. مقاومت آرماتورهای پایین تیر به‌عنوان پارامتر متغیر در نمونه‌های پیش‌ساخته بود. یو و همکاران نتیجه گرفتند که افزایش قابل‌توجه در مقاومت آرماتورهای پایین تیر موجب کاهش شکل‌پذیری اتصال پیشنهادی ایشان شده است [15, 16].

به تازگی در سال ۲۰۲۳ لیو و همکاران اتصالی را پیشنهاد داده‌اند که در آن تیر بتنی پیش‌ساخته به کمک بولت و مهره‌های فولادی به ستون بتنی پیش‌ساخته متصل شده است. در هر یک از نمونه‌های آزمایشگاهی ایشان برای اتصال تیر بتنی پیش‌ساخته به ستون پیش‌ساخته از هشت عدد بولت فولادی با قطر ۲۴ میلی‌متر استفاده شده است لیکن مقاومت بولت‌های فولادی در این نمونه‌های آزمایشگاهی تفاوت دارد. لیو و همکاران نتیجه گرفته‌اند که افزایش مقاومت بولت‌های فولادی موجب افزایش مقاومت تسلیم و مقاومت نهایی اتصال و کاهش زوال سختی اتصال شده است [17].

شکل ۱. اتصال میانی از قاب مقاوم خمشی

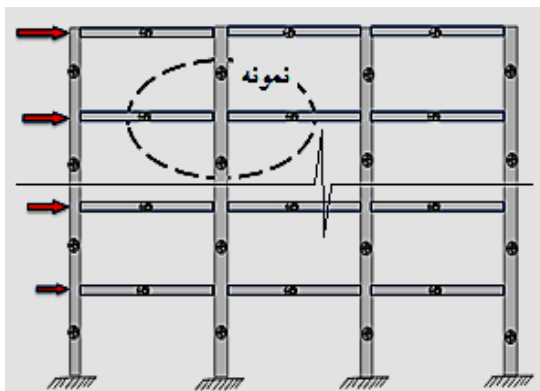


Fig. 1. Middle connection of moment resistant frame

به تازگی در سال ۲۰۲۳ ژوانگ و همکاران برای مدل‌سازی نیروی بازگرداننده در اتصال پیش‌ساخته تیر به ستون با استفاده

خود را از نظر مقاومت و سختی جانبی، شکل‌پذیری و جذب انرژی بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند مقاومت جانبی اتصالات پیشنهادی ۹۵ درصد مقاومت جانبی اتصال یکپارچه است؛ و سختی جانبی اتصالات پیشنهادی بین ۸۰ تا ۹۰ درصد سختی جانبی اتصال یکپارچه است. مدح‌خوان و همکاران نتیجه گرفتند که متفاوت بودن سازوکار انتقال نیرو و وضعیت چشمه‌اتصال، موجب کاهش سختی و مقاومت جانبی اتصالات پیشنهادی ایشان نسبت به اتصال یکپارچه شده است. آنها در پایان مطالعه خود بیان کردند که امکان مدل‌سازی بسیاری از پدیده‌ها در نرم‌افزار وجود ندارد [10, 11].

در سال ۲۰۱۸ اسماعیلی و همکاران باهدف حذف تراکم آرماتورها، نوعی تیر مختلط پیش‌ساخته را معرفی کردند که در پای‌کار نیاز به بتن‌ریزی ندارد. آنها بیان کردند که در بسیاری از موارد برای دستیابی به اتصال مقاوم خمشی نیازمند تراکم آرماتورها برای انتقال لنگر در تیرها و به‌ویژه در ناحیه اتصال آنها است. دو اتصال پیش‌ساخته و درجا با استفاده از آنالیز اجزای محدود در پژوهش آنها مورد مطالعه قرار گرفت و نتیجه‌گیری شد که تیر مختلط پیش‌ساخته پیشنهادی از نظر مقاومت، جذب انرژی و شکل‌پذیری دارای عملکرد مطلوبی است [12]. در مطالعه دیگری که در همان سال ۲۰۱۸ توسط اسماعیلی و همکاران انجام شد، نوعی اتصال تیر به ستون بتنی پیش‌ساخته ارائه شد و سپس با استفاده از آنالیز اجزای محدود، رفتار اتصال پیشنهادی با رفتار اتصالات رایج مقایسه شده و نتیجه گرفته شد که از نظر مقاومت، جذب انرژی و شکل‌پذیری، اتصال پیشنهادی شده عملکرد مطلوبی دارد [13].

در سال ۲۰۲۲ تیمن کول و همکاران اتصال تیر به ستون پیش‌ساخته بتنی با میله‌های رزوه شده را مطالعه کردند. آنها سه نمونه آزمایشگاهی ساختند و تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار دادند؛ یکی از نمونه‌ها مربوط به اتصال یکپارچه است و در آن از بتن معمولی استفاده شده است، دو نمونه دیگر مربوط به اتصال پیش‌ساخته است و در بخش‌هایی از آنها از بتن معمولی و در بخش دیگری از آنها از گروت استفاده شده است. تیمن کول و همکاران نتیجه گرفتند که شکل‌پذیری

علاوه بر نکات فوق، سهولت استفاده از وصله‌های مکانیکی برای تأمین پیوستگی آرماتور طولی در تیرهای نیمه پیش‌ساخته و استفاده از آرماتور با مقاومت بالا به منظور کاهش تراکم آرماتور در المان‌ها و هسته اتصالات سازه‌های بتن‌آرمه موجب شده است تا رفتار چرخه‌ای اتصال میانی در قاب خمشی بتنی نیمه پیش‌ساخته با وصله مکانیکی و آرماتور با مقاومت بالا هدف اصلی پژوهش حاضر باشد. بدین منظور ۴ نمونه اتصال میانی تیر به ستون از طبقات میانی یک قاب خمشی بتنی مشابه شکل (۱) مدنظر قرار گرفته است. ۲ نمونه مینا با بتن درجا و یکپارچه ساخته شده است و ۲ نمونه دیگر به صورت نیمه پیش‌ساخته تولید شده‌اند.

۲- اهداف

ارزیابی عملکرد چرخه‌ای اتصال میانی تیر به ستون نیمه پیش‌ساخته بتنی در آزمایشگاه، هدف کلی پژوهش حاضر است به شکلی که دو پارامتر متغیر اصلی در نظر گرفته شده است. چگونگی تأمین پیوستگی آرماتورهای پایینی تیر در هسته اتصال تیر - ستون نیمه پیش‌ساخته بتنی به عنوان یکی از پارامترهای متغیر اصلی است. تغییر رده مقاومتی آرماتور و استفاده از آرماتور با مقاومت بالا به عنوان پارامتر متغیر اصلی دیگر است.

در راستای هدف کلی پژوهش، اهداف جزئی تعریف شده است. اهداف جزئی پژوهش شامل مطالعه تأثیر پارامترهای متغیر اصلی بر مقاومت تسلیم، مقاومت نهایی، نسبت شکل‌پذیری و ظرفیت جذب انرژی اتصال موردنظر است.

۳- ابزار و روش پژوهش

مشخصات هندسی و مراحل ساخت نمونه‌ها در این قسمت ارائه شده است. در ادامه، مشخصات بتن و فولاد مصرفی و توضیحات مربوط به استقرار نمونه‌های آزمایشگاهی و بارگذاری آمده است.

۱-۳- مشخصات کلی و مراحل ساخت نمونه‌ها

۴ نمونه اتصال ساخته شده شامل ۲ نمونه اتصال یکپارچه MO1 و MO2 به عنوان نمونه‌های مینا و ۲ نمونه اتصال نیمه

از اتصالات مکانیکی، یک مدل ریاضی ارائه کرده و سپس قابلیت مدل ریاضی پیشنهادی خود را به کمک مطالعات آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داده‌اند. مدل ریاضی آنها قابلیت در نظر گرفتن اثر لغزش و باریک‌شدگی در حلقه‌های هیستریزیس را دارد. ژوانگ و همکاران نتیجه گرفته‌اند که مدل ریاضی ارائه شده توسط ایشان به شکل مناسبی می‌تواند اثر باریک‌شدگی در حلقه‌های هیستریزیس را نشان دهد [18].

با مرور تحقیقات انجام شده قبلی مشخص شد که در تعدادی از آنها برای انتقال عکس‌العمل قائم تیر به ستون از ایجاد نشیمن در وجه بیرونی ستون و یا تعبیه برشگیر استفاده شده است؛ پس عکس‌العمل قائم تیر در ناحیه کوچکی از تیر و ستون منتقل شده و موجب تمرکز تنش می‌شود. در تعداد دیگری از تحقیقات پیشین از کابل‌های فولادی U شکل در انتهای تیرها برای اتصال به ستون استفاده شده است؛ و با توجه به مقاومت بالای کابل‌های فولادی می‌بایست طول زیادی از کابل‌ها در بتن تیر مدفون شوند تا طول مهاری و همپوشانی کافی بین کابل‌ها و آرماتورهای تیر تأمین شود؛ پس با توجه به هزینه بالای کابل‌های فولادی، توجیه اقتصادی این روش با چالش روبرو است.

در بعضی تحقیقات انجام شده قبلی علاوه بر عملیات آرماتوربندی و قالب‌بندی و بتن‌ریزی باید از عملیات جوشکاری در ساخت برخی قطعات فولادی برای نصب در انتهای تیر بتنی پیش‌ساخته استفاده شود؛ اضافه شدن عملیات جوشکاری موجب افزایش فعالیت‌های اجرایی، و سختی دستیابی به جوش باکیفیت مناسب در محل پروژه موجب کاهش کیفیت اتصال می‌شود.

اگرچه پژوهشگران در زمینه اتصالات نیمه پیش‌ساخته در سازه‌های بتنی تحقیقاتی انجام داده‌اند لیکن با لحاظ شرایط فعلی ساختمان‌سازی در ایران ضروری است تا اتصالاتی پیشنهاد شود که عکس‌العمل قائم تیر به ستون به شکل مناسب‌تر و در کل ناحیه اتصال از تیر به ستون منتقل شود؛ و کابل‌های فولادی با هزینه و مقاومت بالا در اتصال استفاده نشود و عملیات جوشکاری نیاز نداشته باشد.

عرضی در نمونه نیمه پیش‌ساخته SPC1 از آرماتور با رده مقاومت S400، و در نمونه نیمه پیش‌ساخته SPC2 از آرماتور با رده مقاومت S500 استفاده شده است. مراحل ساخت این دو نمونه نیمه پیش‌ساخته عبارت‌اند از:

- ساخت ستون نیمه پیش‌ساخته: در این مرحله آرماتوربندی کل ستون و سپس قالب‌بندی و بتن‌ریزی مرحله اول ستون در زیر هسته اتصال انجام می‌شود (شکل ۳ الف).
- ساخت تیرهای نیمه پیش‌ساخته: در این مرحله آرماتوربندی آرماتورهای طولی پایین تیرها و آرماتورهای عرضی تیرها انجام می‌شود و سپس بتن‌ریزی مرحله اول تیرها به گونه‌ای انجام می‌شود که نصف پایینی مقطع تیرها بتن‌ریزی شود (شکل ۳ ب). برای آرماتوربندی آرماتورهای طولی پایین تیرها در این مرحله از آرماتورهایی استفاده می‌شود که انتهای سمت هسته اتصال آنها دارای رزوه باشند تا بتوان در مرحله مونتاژ تیرهای نیمه پیش‌ساخته به ستون نیمه پیش‌ساخته از وصله مکانیکی استفاده نمود.

شکل ۳. مراحل ساخت اتصال نیمه پیش‌ساخته

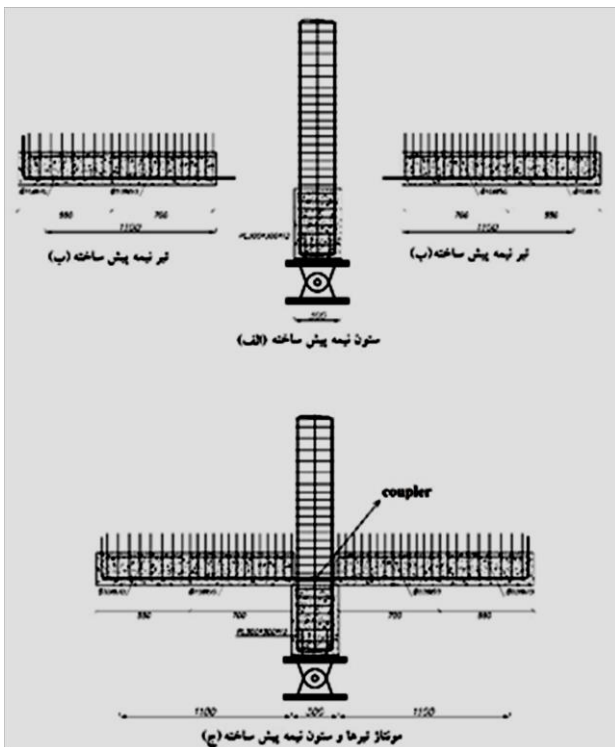


Fig. 3. Construction steps of semi precast connection

پیش‌ساخته SPC1 و SPC2 به‌عنوان نمونه‌های نیمه پیش‌ساخته است. روند تحلیل و طراحی اتصال نیمه پیش‌ساخته بتنی و اتصال یکپارچه در این پژوهش یکسان در نظر گرفته شده است؛ شکل‌پذیری متوسط مدنظر قرار گرفته است. در ۲ نمونه یکپارچه و درجا، آرماتورهای طولی پایین تیر به صورت پیوسته از هسته اتصال تیر - ستون عبور کرده‌اند و در ۲ نمونه نیمه پیش‌ساخته، آرماتورهای طولی پایین تیر در هسته اتصال، دارای وصله مکانیکی هستند. تصویری از وصله مکانیکی استفاده شده در این پژوهش در شکل (۲) نمایش داده شده است.

شکل ۲. تصویری از وصله مکانیکی مورد استفاده



Fig. 2. Picture of used coupler

در نمونه‌های اتصال مینا یعنی MO1 و MO2 بتن‌ریزی تیر و ستون و هسته اتصال، همگی در یک مرحله انجام شده است. در نمونه مینای MO1 از آرماتور با رده مقاومت S400 برای آرماتورگذاری طولی و عرضی تیر و ستون، و در نمونه مینای MO2 از آرماتور با رده مقاومت S500 برای آرماتورهای طولی و عرضی تیر و ستون استفاده شده است. برای ساخت این دو نمونه مینا ابتدا آرماتوربندی تیر و ستون و هسته اتصال به طور کامل انجام شده و پس از قالب‌بندی، بتن‌ریزی تیر و ستون و هسته اتصال به صورت هم‌زمان انجام شده است. در نمونه‌های اتصال نیمه پیش‌ساخته SPC1 و SPC2 بتن‌ریزی شامل دو مرحله است. برای آرماتورهای طولی و

به‌دست‌آمده است و سپس با استفاده از ضرایب موجود در مبحث نهم مقررات ملی ساختمان [19] مقاومت فشاری ۲۸ روزه مانند نمونه استوانه‌ای استاندارد طبق جدول (۱) تعیین شده است.

جدول ۱. مقاومت فشاری بتن مصرفی در نمونه‌ها

Specimens	Consumable concrete stage	f'_c (MPa)
MO1	monolithic concrete	49
MO2	monolithic concrete	48
SPC1	first stage of concreting (46MPa)	48
	second stage of concreting (50MPa)	
SPC2	first stage of concreting (38MPa)	40
	second stage of concreting (42MPa)	

Table 1. Compressive strength of concrete in specimens

در جدول (۱) منظور از عبارت monolithic concrete بتن‌ریزی یکپارچه تیر و ستون و هسته اتصال در نمونه‌های اتصال مبنا است؛ منظور از عبارت first stage مرحله اول بتن‌ریزی شامل ستون نیمه پیش‌ساخته در ناحیه زیر هسته اتصال و همچنین بتن‌ریزی مربوط به نصف پایینی مقطع تیرهای نیمه پیش‌ساخته است؛ و عبارت second stage بیانگر مرحله دوم بتن‌ریزی شامل هسته اتصال و قسمت بالایی ستون نیمه پیش‌ساخته و نیمه بالایی مقطع تیرهای نیمه پیش‌ساخته است.

شکل ۴. تصویری از وصله مکانیکی در آرماتور پایین تیرها در هسته اتصال



Fig. 4. Couplers for the bottom rebars of beams in joint

با انجام آزمایش کششی بر روی میل‌گردها، مقاومت کششی و کرنش میل‌گرد مصرفی در نمونه‌ها طبق جدول (۲) به دست

• مونتاژ تیرهای نیمه پیش‌ساخته به ستون نیمه پیش‌ساخته و تکمیل آرماتوربندی تیرها: دو عدد تیر نیمه پیش‌ساخته در طرفین یک ستون نیمه پیش‌ساخته قرار می‌گیرند به شکلی که آرماتور طولی پایین این دو تیر در هسته اتصال به ستون با وصله مکانیکی به یکدیگر متصل می‌شوند شکل (۳ج)؛ بنابراین پیوستگی آرماتورهای طولی پایین تیرها از طریق رزوه موجود در انتهای میل‌گردها و با وصله مکانیکی در هسته اتصال صورت می‌گیرد. در شکل (۴) تصویری نمایش داده شده است که قبل از خاموت‌گذاری هسته اتصال تصویربرداری شده و نشان می‌دهد که موقعیت وصله‌های مکانیکی در یک راستا هستند و در میانه مقطع ستون قرار می‌گیرند. سپس آرماتورهای طولی بالای تیرها به صورت پیوسته جای‌گذاری می‌شود به شکلی که آرماتورهای طولی بالایی یکی از تیرها به صورت یکسره و بدون انقطاع از هسته اتصال با ستون عبور کرده و به‌عنوان آرماتور طولی بالایی تیر مقابل ادامه پیدا می‌کنند.

• قالب‌بندی تکمیلی: در این مرحله، قسمت‌های بتن‌ریزی نشده از تیر و ستون و هسته اتصال قالب‌بندی می‌شوند. در قسمت بالایی ستون نیمه پیش‌ساخته و نیمه بالایی تیرهای نیمه پیش‌ساخته و هسته اتصال، قالب‌بندی تکمیلی انجام می‌شود.

بتن‌ریزی تکمیلی: مرحله دوم بتن‌ریزی شامل هسته اتصال و قسمت بالایی ستون نیمه پیش‌ساخته و نیمه بالایی مقطع تیرهای نیمه پیش‌ساخته انجام می‌شود.

۲-۳- مشخصات بتن و آرماتور مصرفی در نمونه‌ها

هم‌زمان با بتن‌ریزی نمونه‌های اتصال در مراحل مختلف، نمونه مکعبی با ابعاد ۲۰ سانتی‌متر از بتن مصرفی تهیه شده و در شرایط مشابه نمونه‌های اتصال نگهداری شده است.

عمل‌آوری نمونه‌های بتن مکعبی و بتن مصرفی در نمونه‌های اتصال در محیط مسقف و محصور آزمایشگاه سازه و طبق مبحث نهم مقررات ملی ساختمان با روش آبرسانی انجام شده است. با انجام آزمایش روی نمونه مکعبی بتن مصرفی، ابتدا مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه مکعبی

بالای تیر است. از میل گرد با قطر ۱۰ میلی متر برای آرماتور عرضی در تیرها و ستون‌ها استفاده شده است؛ آرماتور عرضی ستون در هسته اتصال ادامه دارد. جزئیات نمونه‌ها در شکل (۵) نمایش داده شده است.

آمده است. f_y مقاومت تسلیم، f_u مقاومت نهایی، ϵ_y کرنش تسلیم و ϵ_u کرنش نهایی هستند.

جدول ۲. مقاومت کششی و کرنش آرماتور مصرفی در نمونه‌ها

Rebar category	Diameter of rebars (mm)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	ϵ_y (%)	ϵ_u (%)	Explanation
S400	10	364.85	547.49	0.200	28.07	---
S400	16	438.29	668.24	0.210	21.09	---
S500	10	582.80	715.19	0.337	11.16	---
S500	16	640.38	755.18	0.334	14.62	---
S400	16	427.70	648.19	---	---	with coupler
S500	16	565.73	651.89	---	---	with coupler

Table 2. Tensile strength and strain of reinforcement

۴-۳- ابزار اندازه‌گیری، استقرار نمونه‌ها و انجام آزمایش

ابزارهای اندازه‌گیری در این پژوهش شامل تغییرمکان‌سنج (LVDT)، کرنش‌سنج (Strain Gage)، بارسنج (Load cell) و دستگاه ثبت‌کننده اطلاعات (Data Logger) است. در زمان استقرار نمونه‌ها یک عدد تغییر مکان‌سنج به صورت افقی در بالای ستون نصب شده است تا با ثبت تغییر مکان افقی بالای ستون در هر لحظه، زاویه دررفت در هر لحظه از آزمایش تعیین شود. قبل از بتن‌ریزی نمونه‌ها، کرنش‌سنج‌ها روی آرماتور طولی میانی در بالا و پایین مقطع تیر، وصله مکانیکی و دو عدد از آرماتورهای طولی مقطع ستون نصب شده‌اند.

در زمان استقرار نمونه‌ها یک عدد بارسنج افقی در بالای ستون برای اندازه‌گیری نیروی افقی وارد شده توسط جک هیدرولیکی برای اعمال بار جانبی نصب شده است؛ و یک عدد بارسنج قائم در بالای ستون برای اندازه‌گیری نیروی قائم وارد شده توسط جک هیدرولیکی برای لحاظ بار ثقلی نصب شده است. تغییرمکان‌سنج‌ها کرنش‌سنج‌ها و بارسنج‌ها به منظور ثبت اطلاعات در هر لحظه از آزمایش به دستگاه ثبت‌کننده اطلاعات متصل شده‌اند.

۳-۳- مشخصات هندسی نمونه‌ها و آرماتورها

در همه ۴ نمونه اتصال، مقطع ستون به شکل مربع با ابعاد ۳۰ سانتی‌متر، و مقطع تیر در همه نمونه‌ها به شکل مستطیل با عرض ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع مقطع ۳۵ سانتی‌متر است.

برای آرماتورهای طولی و عرضی در نمونه‌های MO1 و SPC1 از آرماتور رده S400، و در نمونه‌های MO2 و SPC2 از آرماتور رده S500 استفاده شده است.

در همه نمونه‌ها از ۸ عدد آرماتور با قطر ۱۶ میلی‌متر با توزیع یکنواخت در پیرامون مقطع ستون برای آرماتور طولی ستون استفاده شده است.

آرماتور طولی تیرها شامل ۴ عدد آرماتور با قطر ۱۶ میلی‌متر در پایین تیر و همچنین ۴ عدد آرماتور با قطر ۱۶ میلی‌متر در

شکل ۵. جزئیات ساخت نمونه‌ها

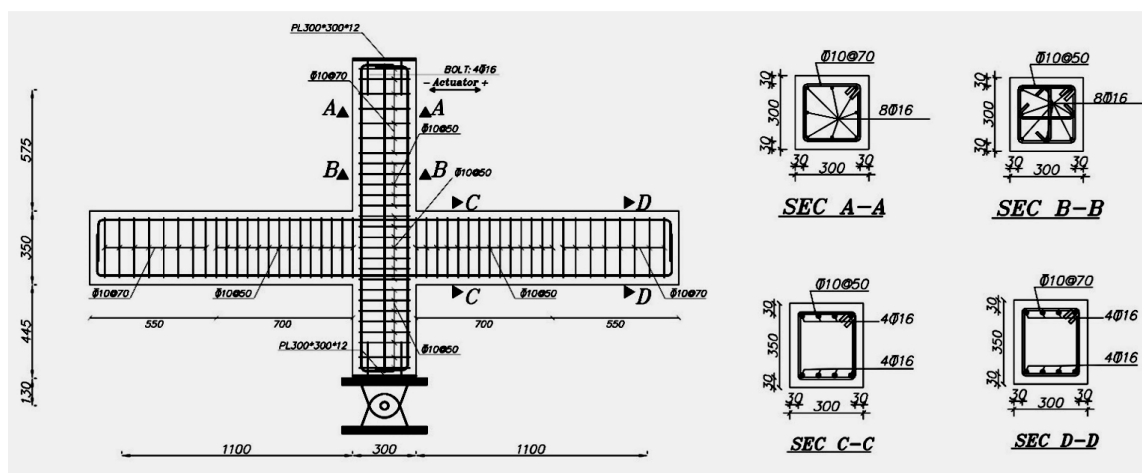


Fig. 5. Details of specimens

دریافت موردنظر در ارتفاع ستون در هر نمونه، مقدار تغییر مکان جانبی مربوط به آن زاویه دریافت در آن گام تعیین شده است.

شکل ۷. تاریخچه زمانی بارگذاری جانبی

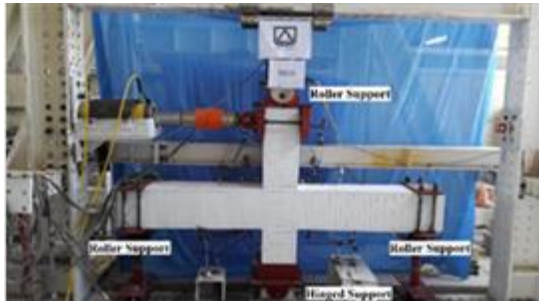


Fig. 7. Time history of lateral loading

شکل (۸) تصویری از نمونه SPC1 را بعد از انجام آزمایش نشان می‌دهد.

شکل ۸. تصویری از نمونه SPC1 پس از انجام آزمایش

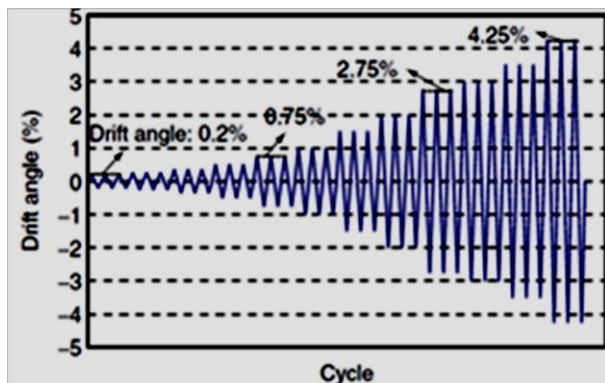


Fig. 8. Picture of SPC1 after testing

۴- نتایج و بحث

پس از اعمال بارگذاری چرخه‌ای به نمونه‌ها و انجام آزمایش، رفتار هیسترتیک به صورت نمودار نیروی جانبی-تغییر مکان جانبی نمونه‌های MO1، MO2، SPC1 و SPC2 به ترتیب در شکل‌های (۹ تا ۱۲) ترسیم شده است. سپس پوش حلقه‌های هیسترتیک یا اصطلاحاً منحنی بک بون (Backbone Curve) ترسیم شده است؛ در شکل (۱۳) منحنی بک بون نمونه‌های آزمایشگاهی به نمایش درآمده است.

پس از ساخت و آماده‌سازی نمونه‌های آزمایشگاهی اتصال، نمونه‌ها در محل آزمایش قرار داده شده است به شکلی که تکیه‌گاه میانی نمونه در زیرستون از نوع تکیه‌گاه مفصلی است؛ تکیه‌گاه‌های سمت چپ و راست نمونه از نوع تکیه‌گاه غلتکی افقی قرار داده شده است تا عکس‌العمل افقی نداشته باشند و در تیرها نیروی محوری ایجاد نشود؛ تکیه‌گاه میانی نمونه در بالای ستون از نوع تکیه‌گاه غلتکی افقی است. در شکل (۶) تصویری از نمونه MO1 نمایش داده شده است که برای انجام آزمایش استقرار یافته است.

شکل ۶. استقرار نمونه MO1



Fig. 6. Set up of MO1

برای لحاظ بار ثقلی در ستون، بار ثابت فشاری به مقدار $0.1f_c' A_g$ در راستای قائم و روبه‌پایین در بالای ستون اعمال شده است؛ بدین منظور از جک هیدرولیکی با ظرفیت ۳۰۰ کیلو نیوتن استفاده شده است.

با استفاده از جک هیدرولیکی با ظرفیت ۵۰۰ کیلو نیوتن، بارگذاری جانبی به صورت رفت و برگشتی در بالای ستون در راستای افقی اعمال شده است. تاریخچه بارگذاری جانبی رفت و برگشتی به نمونه‌ها از ACI T1.1R-01 طبق شکل (۷) مورد استفاده قرار گرفته است [20]. هر یک از نمونه‌های آزمایشگاهی تحت سه سیکل کامل از بار معادل زاویه دریافت ۰/۲٪، ۰/۲۵٪، ۰/۳۵٪، ۰/۵٪، ۰/۷۵٪، ۱٪، ۱/۵٪، ۲٪، ۲/۷۵٪، ۳٪، ۳/۵٪، ۴/۲۵٪ قرار گرفتند به شکلی که به هر نمونه در مجموع ۳۶ سیکل کامل بار جانبی اعمال شده است. بار جانبی به روش گام‌به‌گام اضافه شده و هر گام بارگذاری مربوط به یک زاویه دریافت است. از حاصل ضرب زاویه

شکل ۱۳. منحنی پوش نمونه‌های آزمایشگاهی

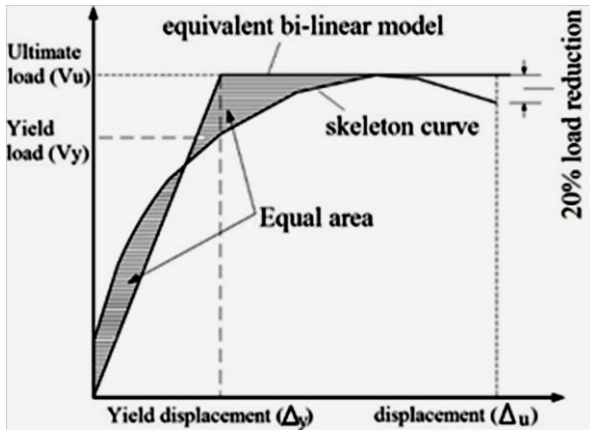


Fig. 13. Backbone curve of specimens

منحنی پوش معادل انرژی نمونه‌ها به صورت نمودار دوخطی معادل‌سازی شده‌اند؛ روش معادل‌سازی نمودار دوخطی و پارامترهای آن طبق شکل ۱۴ است [15]. نمودارهای دوخطی معادل برای نمونه‌ها در شکل ۱۵ ترسیم شده است.

شکل ۱۴. روش دو خطی کردن نمودار یک بون نمونه‌ها [15]

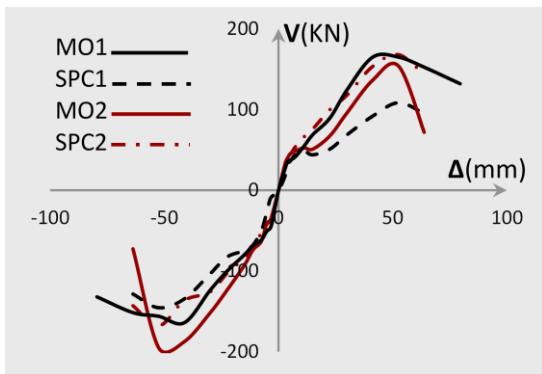


Fig. 14. Method of bilinearization of the backbone [15]

شکل ۱۵. منحنی دو خطی معادل برای نمونه‌ها.

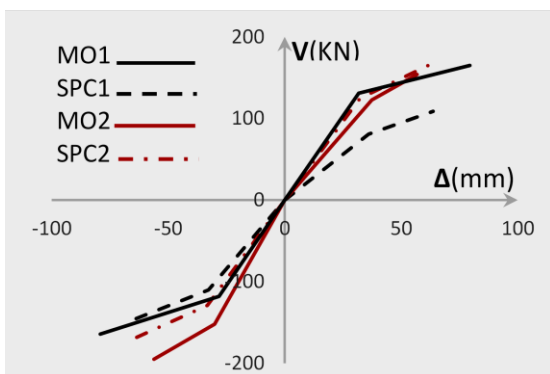


Fig. 15. Equivalent two-line diagram for specimens

شکل ۹. نمودار هیسترتیک نمونه MO1

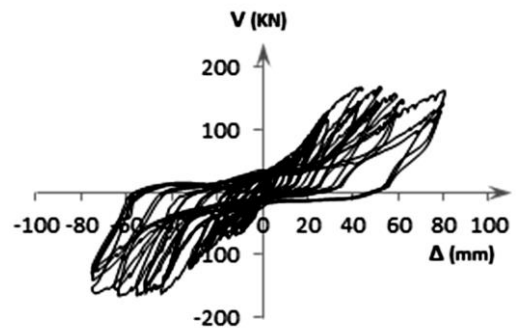


Fig. 9. Hysteresis curve of MO1

شکل ۱۰. نمودار هیسترتیک نمونه MO1

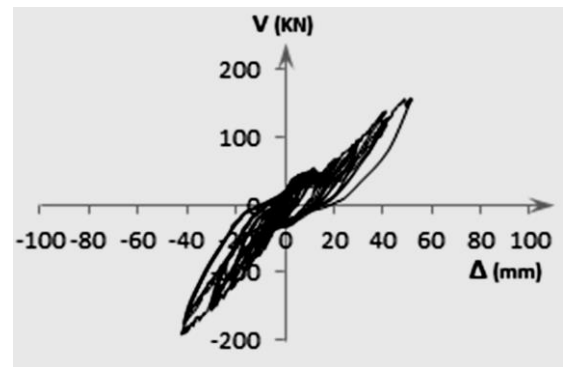


Fig. 10. Hysteresis curve of MO2

شکل ۱۱. نمودار هیسترتیک نمونه SPC1

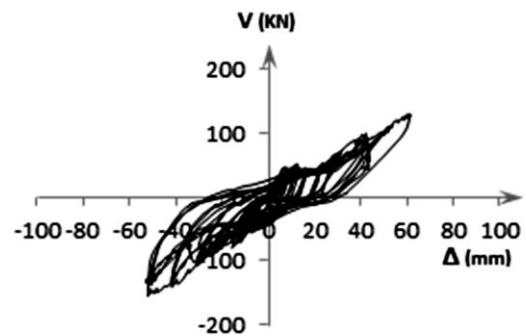


Fig. 11. Hysteresis curve of SPC1

شکل ۱۲. نمودار هیسترتیک نمونه SPC2

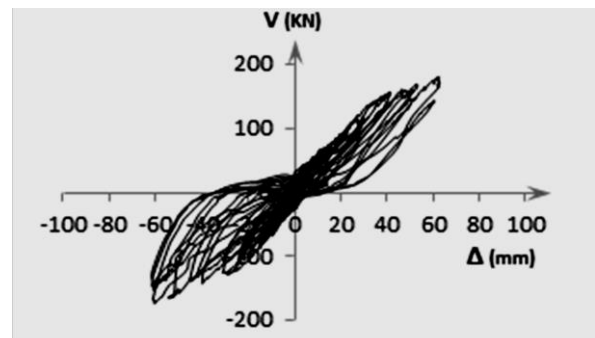


Fig. 12. Hysteresis curve of SPC2

جدول ۵. انرژی جذب شده در نمونه‌ها.

Specimens	MO1	MO2	SPC1	SPC2
Energy (KN.mm)	25726	21164	18550	15827

Table 5. Energy absorbed in specimens

بحث روی تغییرات مقاومت نمونه‌های اتصال به کمک جدول (۶) انجام شده است. نسبت به نمونه MO1، مقاومت تسلیم و مقاومت نهایی نمونه MO2 به ترتیب ۱۰٪ و ۶٪ بزرگ‌تر است.

جدول ۶. جابجایی‌ها و شکل پذیری نمونه‌ها.

ratio	$\frac{(V_y)_{MO2}}{(V_y)_{MO1}}$	$\frac{(V_y)_{SPC2}}{(V_y)_{SPC1}}$	$\frac{(V_y)_{SPC1}}{(V_y)_{MO1}}$	$\frac{(V_y)_{SPC2}}{(V_y)_{MO2}}$
	ratio	1.10	1.32	0.77
ratio	$\frac{(V_u)_{MO2}}{(V_u)_{MO1}}$	$\frac{(V_u)_{SPC2}}{(V_u)_{SPC1}}$	$\frac{(V_u)_{SPC1}}{(V_u)_{MO1}}$	$\frac{(V_u)_{SPC2}}{(V_u)_{MO2}}$
	ratio	1.06	1.32	0.77
ratio	$\frac{(\mu)_{MO2}}{(\mu)_{MO1}}$	$\frac{(\mu)_{SPC2}}{(\mu)_{SPC1}}$	$\frac{(\mu)_{SPC1}}{(\mu)_{MO1}}$	$\frac{(\mu)_{SPC2}}{(\mu)_{MO2}}$
	ratio	0.64	1.02	0.72
ratio	$\frac{(En.)_{MO2}}{(En.)_{MO1}}$	$\frac{(En.)_{SPC2}}{(En.)_{SPC1}}$	$\frac{(En.)_{SPC1}}{(En.)_{MO1}}$	$\frac{(En.)_{SPC2}}{(En.)_{MO2}}$
	ratio	0.82	0.85	0.72

Table 6. Ratios of strength, ductility & energy in specimens

مقاومت تسلیم و مقاومت نهایی نمونه SPC2 به مقدار ۳۲٪ بزرگ‌تر از نمونه SPC1 است. دلیل این تغییرات استفاده از آرماتور با رده مقاومتی بالاتر (S500) در نمونه‌های MO2 و SPC2 است زیرا f_y آرماتورها طبق رابطه (۱) بر مقاومت خمشی مقطع بتن‌آرمه تأثیر مستقیم دارد [21].

$$M_n = A'_s \cdot f_y (d-d') + 0.85f'_c \cdot b \cdot a (d-0.5a) \quad (1)$$

رابطه (۱) بر اساس فرضیه سازگاری کرنش‌ها و تئوری بلوک تنش ویتنی برای مقاطع مستطیل‌شکل با آرماتورهای کششی و فشاری است؛ در این رابطه M_n مقاومت اسمی خمشی مقطع، a ارتفاع بلوک تنش فشاری، b عرض مقطع مستطیل‌شکل، f'_c مقاومت فشاری مشخصه بتن، A'_s مساحت فولاد فشاری، f_y مقاومت تسلیم فولاد فشاری، d فاصله مرکز

بخشی از نتایج آزمایش هر نمونه شامل مقاومت تسلیم V_y و مقاومت نهایی V_u است که از نمودار دوطرفی معادل به‌دست آمده و در جدول (۳) ارائه شده است.

بخش دیگری از نتایج آزمایش، تغییر مکان تسلیم Δ_y ، تغییر مکان نهایی Δ_u و نسبت شکل‌پذیری تغییر مکانی μ است؛ تغییر مکان‌های هر نمونه به کمک نمودار دوطرفی معادل تعیین شده است؛ برای محاسبه نسبت شکل‌پذیری تغییر مکانی هر نمونه آزمایشگاهی از رابطه (۲) استفاده شده است. این بخش از نتایج آزمایش در جدول ۴ آمده است.

جدول ۳. مقاومت تسلیم و مقاومت نهایی نمونه‌ها.

Specimens	Direction	V_y (KN)	$V_{y \text{ average}}$ (KN)	V_u (KN)	$V_{u \text{ average}}$ (KN)
MO1	Forward	131	125	165	165
	Backward	118		164	
MO2	Forward	123	138	154	175
	Backward	152		195	
SPC1	Forward	81	96	109	127
	Backward	110		145	
SPC2	Forward	125	127	168	168
	Backward	129		168	

Table 3. Yield strength & ultimate strength of specimens

جدول ۴. جابجایی‌ها و شکل‌پذیری نمونه‌ها.

Specimens	Direction	Δ_y (mm)	Δ_u (mm)	μ	μ_{average}
MO1	Forward	31.8	79.5	2.5	2.65
	Backward	28.1	79.1	2.8	
MO2	Forward	37.5	56.8	1.5	1.7
	Backward	30	56.1	1.9	
SPC1	Forward	36.1	63.8	1.8	1.9
	Backward	32.6	63.7	2	
SPC2	Forward	32.4	63.8	2	1.95
	Backward	33.2	63.5	1.9	

Table 4. Displacements & ductility of specimens

انرژی جذب شده در خلال رفتار چرخه‌ای نمونه‌ها به عنوان بخش دیگری از نتایج آزمایش است که در جدول (۵) ارائه شده است.

فشاری مقطع بزرگتر می‌شود. بزرگتر شدن ناحیه فشاری مقطع موجب افزایش ارتفاع تار ختشی (فاصله بین دورترین تار فشاری مقطع و تار ختشی) می‌شود و در اثر آن، انحنا ایجاد شده در مقطع بتن‌آرمه افزایش می‌یابد. افزایش انحنا ایجاد شده در مقطع بتن‌آرمه به معنی آن است که مقطع بتن‌آرمه در Δ_{II} کوچک‌تری به کرنش نهایی خود می‌رسد. با توجه به این که کرنش نهایی مصالح مقدار مشخصی هستند؛ پس افزایش رده مقاومتی آرماتورها موجب می‌شود تا مقطع بتن‌آرمه در Δ_{II} کوچک‌تری به کرنش نهایی خود برسد [21]. از سوی دیگر، نتایج آزمایش میل‌گردهای مصرفی طبق جدول (۲) نشان می‌دهد که آرماتورهای با مقاومت بالاتر دارای کرنش نهایی ϵ_{II} کوچک‌تری هستند.

نسبت شکل‌پذیری نمونه SPC1 به اندازه ۲۸٪ کوچک‌تر از شکل‌پذیری نمونه MO1 است؛ زیرا بتن‌ریزی دومرحله‌ای در اتصال نیمه پیش‌ساخته و همچنین استفاده از وصله مکانیکی در آرماتورهای طولی پایین تیرهای نیمه پیش‌ساخته در هسته اتصال موجب شده است تا تغییر مکان بیشینه‌ای که نمونه تحمل می‌کند (Δ_u) کوچک‌تر شود و به دنبال آن طبق رابطه (۲) نسبت شکل‌پذیری نمونه μ کوچک‌تر شود.

با استفاده از جدول (۵) تغییرات انرژی جذب شده در نمونه‌ها هنگام انجام آزمایش مورد بحث قرار گرفته است. انرژی جذب شده در نمونه MO2 به اندازه ۱۸٪ کمتر از انرژی جذب شده در نمونه MO1، و انرژی جذب شده در نمونه SPC2 به مقدار ۱۵٪ کمتر از انرژی جذب شده در نمونه SPC1 است. دلیل این تغییرات استفاده از آرماتور با رده مقاومت بالاتر در نمونه‌های MO2 و SPC2 است؛ زیرا در بررسی انرژی جذب شده، علاوه بر پارامتر شکل‌پذیری اثر مقاومت نیز لحاظ شده است [22].

انرژی جذب شده در نمونه SPC1 به مقدار ۲۸٪ کمتر از انرژی جذب شده در نمونه MO1 است، و انرژی جذب شده در نمونه SPC2 به اندازه ۲۵٪ کمتر از انرژی جذب شده در نمونه MO2 است؛ زیرا بتن‌ریزی دومرحله‌ای در اتصال نیمه پیش‌ساخته و همچنین استفاده از وصله مکانیکی با رویه صاف در آرماتورهای طولی پایین تیرهای نیمه پیش‌ساخته در هسته

سطح آرماتورهای کششی تا دورترین تار فشاری مقطع و d' فاصله مرکز سطح آرماتورهای فشاری تا آخرین تار فشاری در مقطع بتن‌آرمه است.

مقاومت تسلیم و مقاومت نهایی نمونه SPC1 به اندازه ۲۳٪ کوچک‌تر از مقاومت‌های مانند در نمونه MO1 است. نسبت به نمونه MO2، مقاومت تسلیم و مقاومت نهایی نمونه SPC2 به ترتیب ۸٪ و ۴٪ درصد کوچک‌تر است. دلیل این تغییرات نیمه پیش‌ساخته بودن اتصال و همچنین استفاده از وصله مکانیکی در آرماتورهای طولی پایین تیرهای نیمه پیش‌ساخته در هسته اتصال است؛ زیرا در نمونه‌های نیمه پیش‌ساخته، بتن‌ریزی در دو مرحله مجزا انجام شده است و پیوستگی اجزای مقطع کمتر از حالت بتن‌ریزی یکپارچه شده است. همچنین در نمونه‌های نیمه پیش‌ساخته، آرماتورهای طولی پایین تیرها در هسته اتصال دارای وصله مکانیکی با رویه صاف شکل‌های (۲ و ۴) هستند؛ پس در مقایسه با نمونه‌های یکپارچه - که در آنها آرماتورهای طولی پایین تیرها به صورت پیوسته از هسته اتصال عبور کرده‌اند - مقاومت تسلیم و مقاومت نهایی نمونه‌های نیمه پیش‌ساخته کاهش پیدا کرده است.

به کمک جدول (۶) تجزیه و تحلیل مربوط به تغییرات نسبت شکل‌پذیری نمونه‌های آزمایشگاهی انجام شده است. نسبت شکل‌پذیری نمونه MO2 به مقدار ۳۶٪ کوچک‌تر از نمونه MO1 است؛ زیرا افزایش رده مقاومتی آرماتورها در نمونه MO2 موجب شده است تا تغییر مکان نهایی Δ_{II} نمونه MO2 کوچک‌تر شود و طبق رابطه (۲) کوچک‌تر شدن Δ_{II} موجب کاهش μ می‌شود.

$$\mu = \frac{\Delta_u}{4y} \quad (2)$$

پشتوانه فنی این موضوع که افزایش مقاومت آرماتورها موجب کوچک‌تر شدن تغییر مکان نهایی Δ_{II} نمونه می‌شود با استفاده از مرجع [21] بیان می‌شود. برای حفظ تعادل نیرو در مقطع بتن‌آرمه باید نیروی فشاری با نیروی کششی در مقطع بتن‌آرمه برابر باشند؛ افزایش مقاومت کششی آرماتورها موجب افزایش نیروی کششی در مقطع می‌شود؛ پس برای حفظ تعادل نیرو در مقطع بتن‌آرمه، نیروی فشاری و مساحت ناحیه

کاهش مقاومت هنگامی که از آرماتور رده S400 استفاده شود به مقدار ۲۳٪ است.

- نیمه پیش‌ساختگی اتصال موجب کاهش ۲۸ درصدی شکل‌پذیری اتصال در نمونه‌ای شده است که در ساخت آن از آرماتور رده S400 استفاده شده است.

- نسبت به اتصالات یکپارچه، انرژی جذب شده در نمونه اتصالات نیمه پیش‌ساخته ۲۸٪-۲۵٪ کوچک‌تر است.

در تحقیقات قبلی انجام شده توسط پژوهشگران نتیجه‌گیری شده است که مقاومت و جذب انرژی در اتصالات پیش‌ساخته بتنی کمتر از اتصال یکپارچه است [10,13,14]. همچنین در تحقیقات قبلی نتیجه‌گیری شده است که افزایش مقاومتی آرماتورها موجب افزایش مقاومت تسلیم و مقاومت نهایی اتصال پیش‌ساخته می‌شود [17]. پس نتایج این پژوهش با تحقیقات انجام شده توسط دیگر پژوهشگران همسو است.

برای مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود تا ضریب رفتار قاب‌های بتنی متشکل از اتصالات نیمه پیش‌ساخته پیشنهادی در این پژوهش مورد مطالعه قرار بگیرد. همچنین پیشنهاد می‌شود در ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی از بتن با مقاومت بالا استفاده شود و رفتار چرخه‌ای آنها مطالعه شود.

۶- سپاسگزاری

از همفکری جناب آقایان دکتر گرامی، دکتر قلهکی، دکتر خداکرمی و دکتر ضیایی فر تشکر می‌شود.

همچنین بابت همکاری‌های آزمایشگاهی جناب آقایان مهندس بخشایشی و مهندس فیروز بخت و سرکار خانم مهندس ذاکری قدردانی می‌شود.

References

- [1] Alcocer S. M., Carranza R., Perez-Navarrete D. & Martinenz R. 2002 Seismic tests of beam-to-column connections in a precast concrete frame. *PCI Journal*, 47(3), 70-89.
- [2] Guerrero H., Rodriguez V., Escobar A., Alcocer S. M., Bennetts F. & Suarez M. 2019 Experimental tests of precast reinforced concrete beam-column connections. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 125, 105743.

اتصال موجب شده است تا پیوستگی اجزای مقطع کمتر از اتصالات یکپارچه باشد و به دنبال آن، قابلیت جذب انرژی اتصالات نیمه پیش‌ساخته کوچک‌تر از قابلیت جذب انرژی اتصالات یکپارچه شود.

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، چهار نمونه اتصال میانی از یک قاب خمشی بتن‌آرمه ساخته شده است و سپس تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفته‌اند. در ساخت دو عدد از این نمونه‌ها از آرماتور رده S400 و در دو نمونه دیگر از آرماتور رده S500 استفاده شده است. دو عدد از نمونه‌ها در یک مرحله بتن‌ریزی شده‌اند و دارای بتن یکپارچه هستند؛ دو نمونه دیگر نیمه پیش‌ساخته هستند و بتن‌ریزی آنها در دو مرحله انجام شده است و برای تأمین پیوستگی آرماتورهای طولی پایین تیرها از وصله مکانیکی در هسته اتصال استفاده شده است.

در محدوده فرض‌ها، بارگذاری، مصالح مورد استفاده و جزئیات بکار رفته در ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی، نتایج این پژوهش بیان شده است. پس از مطالعه و بررسی رفتار چرخه‌ای نمونه‌های مورد آزمایش، نتایج زیر به دست آمده است:

- هم در نمونه اتصالات یکپارچه و هم در نمونه اتصالات نیمه پیش‌ساخته، استفاده از آرماتور با رده مقاومتی بالاتر موجب افزایش مقاومت تسلیم و مقاومت نهایی نمونه‌ها شده است؛ مقدار این افزایش مقاومت در نمونه اتصالات پیش‌ساخته ۳۲٪ است.

- استفاده از آرماتور با رده مقاومت بالاتر در نمونه اتصال یکپارچه موجب کاهش ۳۶ درصدی شکل‌پذیری اتصال شده است.

- هم در نمونه اتصالات یکپارچه و هم در نمونه اتصالات نیمه پیش‌ساخته، افزایش رده مقاومتی آرماتورها موجب شده است تا انرژی جذب شده در اتصالات ۱۸٪-۱۵٪ کاهش پیدا کند.

- نیمه پیش‌ساخته بودن اتصال موجب کاهش مقاومت تسلیم و کاهش مقاومت نهایی اتصال شده است؛ مقدار این

- [13] Esmaili J. & Ahooghalandary S. N. & Farzam M. 2018 Introducing of a Typical Beam-to-Column Connection and Comparison of Its Behavior with Conventional Connections. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 48.2(91), 1-15. (In Persian)
- [14] Tumengkol H. A., Irmawaty R., Parung H. & Amiruddin A. 2022 Precast Concrete Column Beam Connection Using Dowels Due to Cyclic Load. *International Journal of Engineering*, 35(1), 102-111.
- [15] Yu J., Zhang E., Xu Z. & Guo Z. 2022 Seismic Performance of Precast Concrete Frame Beam-Column Connections with High-Strength Bars. *Materials*, 15(20), 7127.
- [16] Yu J., Zhang W., Tang Z., Guo X. & Pospisil. S. 2020 Seismic behavior of precast concrete beam-column joints with steel strand inserts under cyclic loading. *Engineering Structures*, 216, 110766.
- [17] Liu J., Yu D., Ding K. & Liu Y. 2023 Seismic Performance of a New Assembled Bolt-Connected Concrete Beam-Column Joint: Experimental Test and Finite Element Modeling. *Applied sciences*, 13(1), 73.
- [18] Zhuang M. L., Sun C., Bai L., Gao L., Qiao Y., Zhang W., Lu C., Li Z., Ma Y. & Zhao Q. 2023 A restoring force model for a novel type of precast beam-to-column joints using mechanical connections. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01840.
- [19] Ministry of Roads & Urban Development Islamic Republic of Iran, *Topic 9th of National Building Regulations: Design and construction of reinforced concrete buildings*. Iran, 2013. (In Persian)
- [20] ACI T1.1-01 2001 *Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing*. ACI Innovation Task Group 1 and Collaborators, American Concrete Institute, Detroit, USA.
- [21] Key-Nia A. M., *Analysis and design of reinforced concrete structures*, Iran, Isfahan: Jahad Daneshgahy of IUT, 2016. (In Persian)
- [22] Tabeshpour M. R., *Nonlinear analysis of structures*, Iran, Tehran: Fadak, 2018. (In Persian)
- [3] Khaloo A. R. & Parastesh H. 2003 Cyclic loading of ductile precast concrete beam-column connection. *ACI Structural Journal*, 100(3), 291-296.
- [4] Khaloo A. R. & Parastesh H. 2003 Cyclic loading Response of Simple Moment-Resisting Precast concrete beam-column connection. *ACI Structural Journal*, 100(4), 440-445.
- [5] Parastesh H., Hajirasouliha I. & Ramezani R. 2014 A new ductil moment-resisting connection for precast concrete frames in seismic regions: An experimental investigation. *Engineering Structures*, 70, 144-157.
- [6] Ha S. S., Kim S. H., Lee M. S. & Moon J. H., 2014 Performance Evaluation of Semi Precast Concrete Beam-Column Connections with U-Shaped Strands. *Advances in Structural Engineering*, 17 (11), 1585-1600.
- [7] Ha S. S., Kim S. H., Moon J. H. & Lee L. H. 2010 Interior Beam-Column Joints With Wire Strands Subjected to Reverse Cyclic Loads. *Proceedings of the 9th U.S. National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering*, Paper No 1673.
- [8] Shariatmadar H. & Zamani Beydokhti E. 2014 An Investigation of Seismic Response of Precast Concrete Beam to Column Connections: Experimental Study. *ASIAN JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING*, 15(1), 41-59.
- [9] Shariatmadar H. & Zamani Beydokhti E. 2011 Experimental Investigation of Precast Concrete Beam to Column Connections Subjected to Reversed Cyclic Loads. *6th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering*.
- [10] Madhkhan M., Bahrami S. & Nazemi N. 2017 Numerical Investigation of Proposed Semi-Rigid Beam to Column Frame Connections. *Modares Civil Engineering Journal*, 17 (3), 171-182. (In Persian)
- [11] Bahrami S., Madhkhan M., Shirmohammadi F. & Nazemi N. 2017 Behavior of two new moment resisting precast beam to column connections subjected to lateral loading. *Engineering Structures*, 132, 808-821.
- [12] Esmaili J. & Ahooghalandary S. N. 2018 Introducing a Composite Beam in Precast Moment Frame with Aim of Eliminating Reinforcement Congestion in the Beam Without the Need for In-Suite Concrete. *Modares Civil Engineering Journal*, 18 (2), 13-24. (In Persian)

Experimental Study of the Cyclic Behavior of Semi-Precast Connection in Concrete Frames with Coupler and High Strength Reinforcement

M Heravi¹, R Vahdani^{*2}, A Kheyroddin³

1- PhD student in civil engineering, Semnan university, Semnan

2- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan university, Semnan

3- Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan university, Semnan

Received: 2022/04/12

Accepted: 2023/06/21

*rvahdani@semnan.ac.ir

Abstract

The four experimental samples of middle beam-column connection of the reinforced concrete moment resisting frame were made. In the stage of making the experimental specimens, the two main differences between the specimens were included the strength category of reinforcement and the semi-precaster connection. The two monolithic specimens (MO1 & MO2) were made using in-situ and continuous concreting in such a way that the reinforcement and concreting of the beam and column and the connection core were all done in one step; Two other specimens are semi-precaster connection (SPC1 & SPC2). The semi-precaster connection is built in such a way that coupler is used and does not require welding on the project site. In one of the monolithic specimens (MO1) is used S400 grade reinforcement, and in the other monolithic specimen (MO2) is used S500 grade reinforcement. In one of the semi-precaster specimens (SPC1) are used S400 grade reinforcement, and in the other semi-precaster specimen (SPC2) is used S500 grade reinforcement. In all of the four specimens, the cross-section of the column is square with dimensions of 30 cm; and the cross-section beams in all specimens is rectangular with a width of 30 cm and a height of 35 cm. In all specimens, 8 reinforcements with a diameter of 16 mm with uniform distribution in the column section are used for the longitudinal reinforcement of the column; The longitudinal reinforcement of the beams includes 4 reinforcements with a diameter of 16 mm at the bottom of beam and also 4 reinforcements with a diameter of 16 mm at the top of beam; reinforcements with a diameter of 10 mm have used for shear reinforcement in beams and columns; The shear reinforcements of column continue in the connection core. In the monolithic specimens, the bottom longitudinal reinforcements of the beam have continuously passed through the beam-column connection core, while in the two semi-precaster specimens, the bottom longitudinal reinforcements of the beam have coupler in the connection core. Tests to determine the compressive strength of used concrete as well as tests to determine the tensile strength of used reinforcements have been done. After making and curing of specimens, cyclic load was applied according to ACI T1.1R-01; then parameters such as yield strength, ultimate strength, ductility and absorbed energy have been studied. In the range of variable parameters and materials used in this research, it is concluded that increasing in the strength of reinforcements has resulted in increasing the yield strength and ultimate strength of specimens; In such a way that the strength of monolithic specimens is increased by +8% and the strength of semi-precaster specimens are increased by +32%. Increasing the strength of reinforcements has reduced the ductility of monolithic specimens by -36%. Increasing strength of reinforcements has resulted in decreasing the absorbed energy -18% of monolithic specimens and -15% of semi-precaster specimens. The yield strength and ultimate strength of semi-precaster specimens are smaller than monolithic specimens. When the S400 reinforcement is used on the specimens, the yield strength and ultimate strength of the semi-precaster specimen is 23% smaller than and the ductility ratio is 28% smaller than the monolithic specimen. The energy absorbed in the semi-precaster specimen is 28% smaller than it in monolithic specimen.

Keywords: Yield strength & Ultimate strength, Ductility ratio, Absorbed energy, Middle connection of frame, Cyclic load.